Journal of Korean Society on Water Environment, Vol. 37, No. 4, pp. 286-295 (July, 2021)
pISSN 2289-0971 eISSN 2289-098X https://doi.org/10.15681/KSWE.2021.37.4.286

고속도로 노면퇴적물의 특성 및 도로청소에 의한 입도별 제거효율 분석

강희만[1] · 김황희[2] · 전지홍[3,†]

[1]한국도로공사 도로교통연구원 환경연구실 · [2](주)콘텍이엔지 · [3]국립안동대학교 환경공학과

Analysis of Characteristics and Removal Efficiency of Road-deposited Sediment on Highway by Road Sweeping According to Particle Size Distribution

Heeman Kang[1] · Hwang Hee Kim[2] · Ji-Hong Jeon[3,†]

[1]Korea Expressway Corporation Research Institute
[2]CONTECH ENG Co., Ltd.
[3]Department of Environmental Engineering, Andong National University

(Received 6 July 2021, Revised 20 July 2021, Accepted 22 July 2021)

Abstract

The removal efficiency of road-deposited sediment (SDR) by road sweeping was analyzed by performing particle size analysis before and after road sweeping at four highways during May to December 2019. The SDR accounted for the largest proportion in the range of 250 to 850 ㎛ and the degree of its proportion had an effect on the particle size distribution curve. The particle size distribution of the collected sediments showed a similar distribution at all sites. Below 75 ㎛, the removal efficiency of SDR showed a constant value around 40%, but above 75 ㎛, it increased as the particle size increased. The removal efficiency was 82-90% (average 86%) for gravel, 66-93% (average 79%) for coarse sand, 35-92% (average 64%) for fine sand, 29-69% (average 44%) for very fine sand, 19-58% (average 40%) for silt loading, 10-59% (average 40%) for TSP, 13-57% (average 40%) for PM10, and 15-61% (average 38%) for PM2.5. SDR removal efficiency showed an average of 69% for the four highways. It was found that if the amount of SDR was less than 100 g/m^2, it was affected by the road surface condition and had a large regional deviation. As such, the amount of SDR and the removal efficiency increased. The fine particles, which have relatively low removal efficiency, contained a large amount of pollutants, which is an important factor in water and air pollution. Therefore, various measures to improve the removal efficiency of fine particles in SDR by road sweeping are needed.

Key words : Highway, Particle size distribution, Road-deposited sediment (SDR), Road sweeping

[1] 연구위원(Deputy Research Director), kheeman@ex.co.kr, https://orcid.org/0000-0002-6284-4861
[2] 연구원(Researcher), hwang1032@contecheng.co.kr, https://orcid.org/0000-0002-1734-8199
[3,†] Corresponding author, 교수(Professor), jhjeon@anu.ac.kr, https://orcid.org/0000-0002-4110-0003

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. Introduction

도로 노면퇴적물(Road-deposited sediment, RDS)은 다양한 형태의 오염물질을 포함하고 있으며 자동차, 브레이크, 타이어, 매연, 아스팔트 마모 등에 의해 입자성 오염물질의 형태로 도로노면에 축적된다(Calvillo et al., 2015). 도로 노면퇴적물의 주요 무기오염물질은 Zn, Cu, Pb, Cr, Ni, Cd 등이며 노면퇴적물에서 광범위한 VOCs와 PAHs가 검출되고 있으며 고농도의 PAHs를 함유하고 있다(Cho, 2003; Gadd and Kennedy, 2000; Van Donkelaar, 1990; Zhao et al., 2010).

도로 노면퇴적물은 강우시 강우유출수와 함께 비점오염원으로써 하천으로 유입되어 하천의 수질오염을 야기시키며, 평상시 자동차 운행에 의해 재비산되어 대기오염을 유발시킨다(ME, 2008). 도로 노면퇴적물의 입자크기에 따라서 오염물질농도에 큰 차이를 보이는데, 63 ㎛이하에서 TOC, TN, TP, 중금속항목 모두 가장 높은 농도를 나타내는 것으로 보고되고 있다(Jeong et al., 2020; ME, 2012). 도로 노면퇴적물 중 75 ㎛이하의 입자를 재비산 오염원(silt loading)으로 정의하며 국내 연간 비산먼지 배출량 중 도로재비산먼지량은 약 38%를 차지하고 있는 것으로 보고되고 있다(National Air Emission Inventory and Research Center, 2017). 도로 노면퇴적물 중 미세입자는 수질오염측면(Ball et al., 1998; Malmquist, 1979)에서나 대기오염측면(Amato et al., 2009; Martuzevicius et al., 2011)에서 중요하다.

도로 노면퇴적물에 대한 입도분포분석에 대한 연구가 몇몇 연구자에 의해 수행되었다. Lee et al. (2020)은 시화산업단지 도로축적퇴적물에 대한 입도분석과 중금속 분포 특성을 실시한 결과, 250～500 ㎛ 크기에서 가장 높은 비율(28.4%)를 차지하였으며, 63 ㎛이하에서는 12.4%를 차지하는 것으로 보고되었다. Kim et al. (2015)은 전라북도에 J시에 위치한 도로축적퇴적물의 입도본포를 분석한 결과 1000 ㎛이상이 대부분을 차지하는 것으로 보고하였다. Kim and Lee (2006)는 도심지 도로 4지점을 대상으로 도로 노면퇴적물의 입도분석을 실시한 결과 425～850 ㎛ 크기에서 가장 높은 비율(28.5～46.4%)를 나타내었으며 74 ㎛ 이하에서는 0.6～1.3%의 범위를 나타내었다. Jeong et al. (2011)은 도심시 도로수거퇴적물의 입도분포를 분석한 결과 75 ㎛ 이하에서 6.33%를 차지하는 것으로 나타났다. Sartor and Boyd (1972)는 도로청소에 의한 도로축적퇴적물의 입자크기별 청소효율을 분석한 결과 2,000 ㎛이상에서는 79%의 저감효율을, 43 ㎛이하에서는 15%의 청소효율을 나타내었다. ME (2012)에서는 고속도로 1곳과 국도 혹은 지방도 2곳, 도심지 도로 1곳을 대상으로 진공청소차에 의한 도로청소에 의해 75 ㎛ 이하의 점토/미사는 －94.2～95.5%의 저감효율을, 75 ㎛ 이상인 모래/자갈에서는 44.7～84.0%의 저감효율이 있는 것으로 보고하였다. Kang and Kang (2014)은 경기도 용인시 기흥구에 위치한 지방도로를 대상으로 도로청소에 의한 입도별 저감효율을 분석한 결과 2000 ㎛이상에서는 60%, 63～2000 ㎛에서는 47%, 63 ㎛이하에서는 26%의 저감효율을 나타내었다. 이상으로 도로청소에 의한 도로축적퇴적물의 입도분포별 제거효과와 관련된 연구사례를 분석한 결과 고속도로를 대상으로 한 연구사례가 거의 없는 실정이다.

본 연구는 수도권 인근에 위치한 경부・경인・서해안・중부고속도로를 대상으로 도로청소 전・후 의 노면퇴적물과 도로청소차에 의해 수거된 퇴적물의 입도분포를 분석하고, 입도별 도로청소에 의한 제거효율을 산정하고 제거효율에 영향을 주는 인자들을 고찰하였다.

2. Materials and Methods

2.1 연구대상지점

수도권 인근의 4개의 고속도로인 중부고속도로, 경부고속도로, 경인고속도로, 서해안고속도로를 연구대상지점으로 선정하고 접근성과 안정성을 고려하여 시료채취지점을 선정하였다(Fig. 1). 노선별 측정지점의 특징은 Table 1과 같으며, 일일 교통량 기준으로 경부선이 210,294대로 가장 많았으며, 중부선이 66,720대로 일일 교통량이 가장 낮았다(Korea Expressway Corporation, 2021).

2.2 시료채취 및 분석방법

선행 연구에 따르면 도로연석으로부터 약 1m 거리까지의 도로 노면퇴적량은 전체 퇴적량의 75%를 차지하고, 약 2.5m의 거리까지는 90%를 차지하는 것으로 보고되고 있다(U. S. EPA., 1985; USGS, 2007). 시료채취는 실험의 안전성을 고려하여 도로연석에서 1m까지 길이 3m로 구획화하여 3구간

Table 1. Characteristics of sampling sites

Highway	Length of site (km)	Daily traffic	Average speed (km/h)
Jungbu	4.9	66,720	81.1
Gyeongin	4.9	121,826	95.8
Seohaean	3.2	130,183	90.8
Gyeongbu	2.7	210,294	84.5

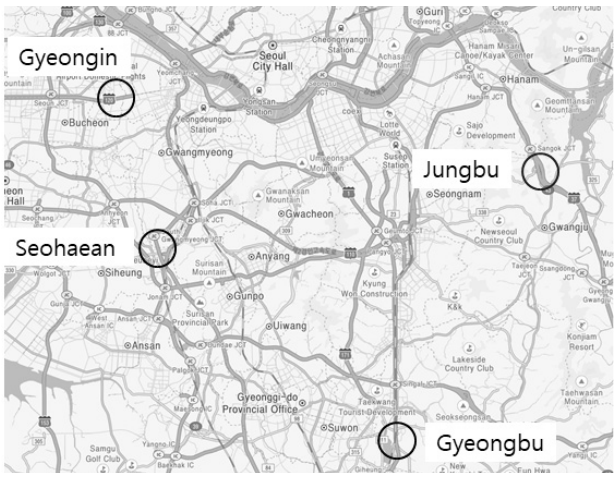


Fig. 1. Sampling sites.

Table 2. Monitoring dates and dry days

	Jungbu		Gyeongin		Seohaean		Gyeongbu	
	Date	Dry days	Date	Dry days	Date	Dry days	Date	Dry days
Round1	5/14	16	5/17	22	5/22	19	5/28	1
Round2	9/18	4	10/15	8	9/10	8	7/9	11
Round3	11/7	9	10/29	1	10/10	3	9/24	2
Round4	-	-	-	-	10/23	16	11/5	7

Table 3. Classification according to particle size

Classification				Particle size (㎛)
Gravl				>4,750
				2,000～4,750
Coarse sand				850～2,000
				250～850
Fine sand				125～250
Very fine sand				75～125
Silt loading				50～75
	TSP			10～50
		PM_{10}		2.5～10
			$PM_{2.5}$	< 2.5

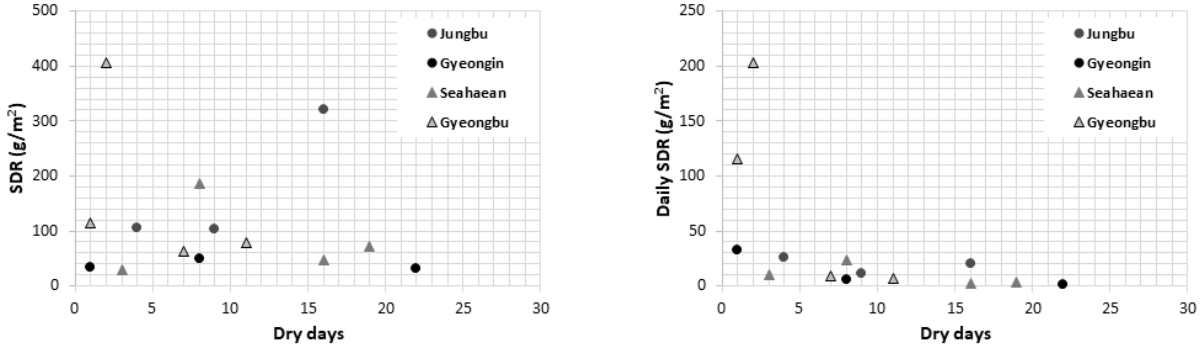
(도로청소 전 구간, 완충구간, 도로청소 후 구간)으로 나누어 건식진공흡입기를 이용하여 시료를 채취하였으며, 청소차에 의한 수거퇴적물은 각 지사의 퇴적물 야적장에서 시료를 채취하였다. 노선별 모니터링은 2019년 5월에서 11월 사이 이루어졌으며, 중부고속도로와 경인고속도로 지점에서는 총 3회, 서해안고속도로와 경부고속도로 지점에서는 총 4회 모니터링이 실시되었으며 건기일수는 1～22일 사이이다(Table 2).

채취된 시료는 105±5 ℃의 온도에서 24시간 건조 후 채분석을 실시하였다. 체가름에 의한 입도시험(KS F 2302)은 직경 4,750 ㎛, 2,000 ㎛, 850 ㎛, 250 ㎛, 75 ㎛의 체에 체가름을 한 후, 각 체에 남아 있는 무게를 측정하여 체가름 분석을 실시하였으며, 75 ㎛를 통과한 시료는 다시 입자크기 분석기(Mastersizer 3000)에 의해 50～75 ㎛, 10～50 ㎛, 2.5～10 ㎛, 2.5 ㎛이하가 각각 차지하는 질량비율에 75 ㎛를 통과 시료 총 무게를 곱하여 각 입경별 차지하는 무게를 구하였다. 입도분포 범위별 토양분류는 미지질국(Breault et al., 2005)의 분류를 참조하여 결정하였으며, 75 ㎛이하부터는 환경부(ME, 2008) 도로 재비산 측면에서의 입자크기를 기준으로 도로노면 퇴적물의 재비산 입자크기(Silt loading, 75 ㎛이하)와 대기 중 부유하는 총먼지(Total Suspended Particles, TSP, 50 ㎛이하), 미세먼지(PM_{10},10 ㎛이하), 초미세먼지($PM_{2.5}$, 2.5 ㎛이하) 등을 고려하여 분류하였다(Table 3).

3. Results and Discussions

3.1 건기일수별 노면퇴적량

각 지점별 3～4회 걸쳐 측정된 도로청소 전 노면퇴적량과 건기일수와의 관계를 분석한 결과는 Fig. 2(a)와 같다. 여기서, x축은 Table 2의 건기일수이며, y축은 도로청소 전 노면퇴적량이다. 그 결과 도로청소 전 도로 노면퇴적량과 건기일수와는 일정한 경향을 찾을 수 없었다. Calvillo et al. (2015)은 도로축적퇴적물은 건기일수가 길어질수록 일별 퇴적량은 감소하지만, 도로노면에 축적되는 양은 기후에 영향을 받는 것으로 보고하고 있다. 본 연구에서는 동일한 측정시간에서 시간별로 퇴적물이 누적되는 양을 측정한 것이 아니며 측정기간이 5월～11월 사이 측정된 노면퇴적량과 그 시점에서의 건기일수이다. 본 연구결과 시간별 도로노면에 퇴적되는 양은 측정 시기에 따라 다른 것으로 나타났다. 노면퇴적량을 건기일수로 나눈 건기일수별 일별 퇴적량은 Fig. 2(b)와 같이 일정한 경향을 나타내는데, 건기일수가 짧을수록 일별 퇴적량은 높은 값을 나타내었으며 건기일수가 길어질수록 일별 퇴적량이 작았다. 이는 비록 측정시기에 따라 일별 축적되는 퇴적량은 다를지라도 선행연구결과인 시간이 지날수록 단위시간 당 퇴적량이 감소하는 경향을 반영하였다.

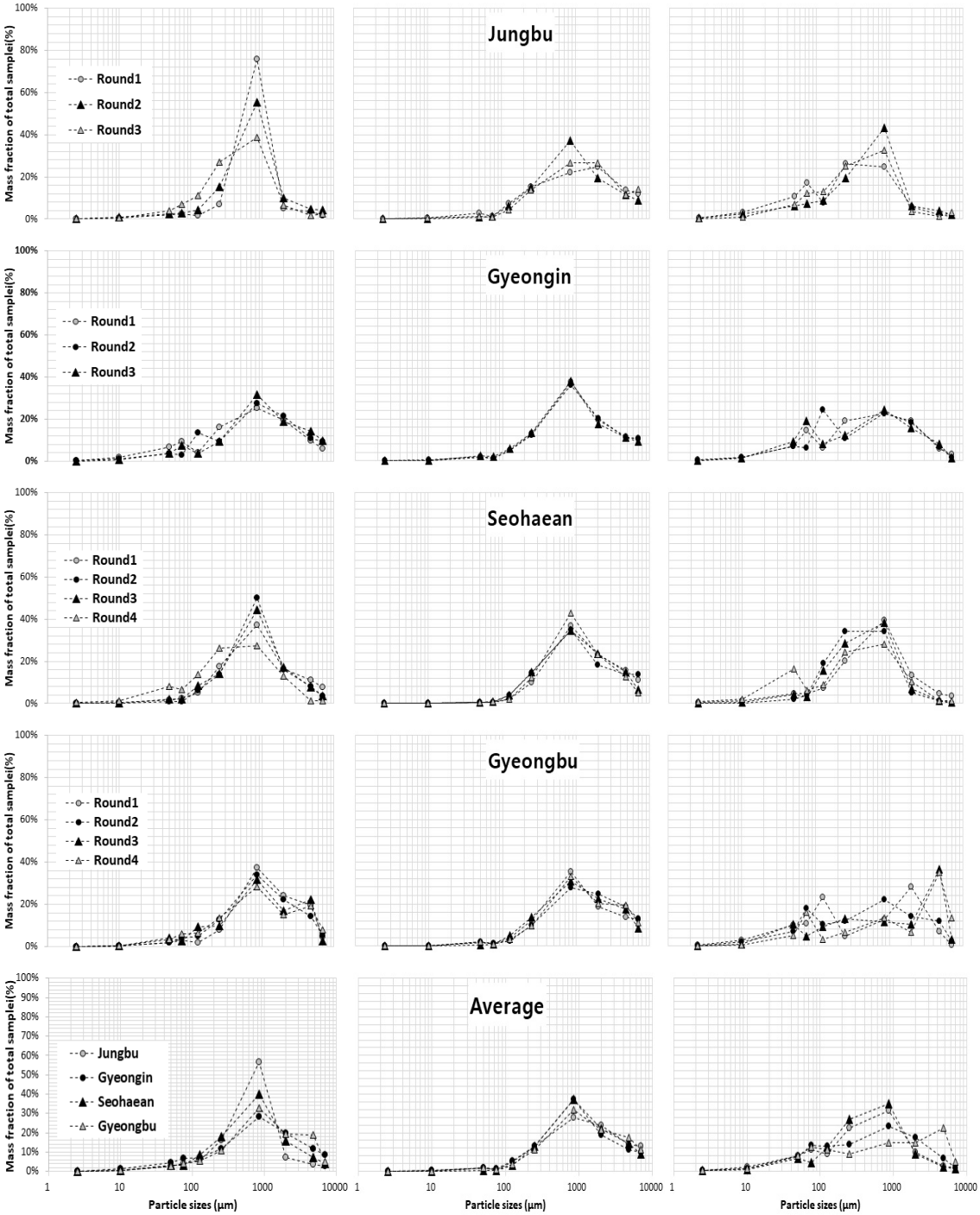


(a) SDR during dry days (b) Daily SDR

Fig. 2. SDR on highway according to dry days.

3.2 입자 크기별 차지하는 비율

도로청소 전・후 노면퇴적물 및 수거퇴적물의 입자크기별 차지하는 비율은 Fig. 3과 Table 4～6과 같다. 도로청소 전・후 노면퇴적물 및 수거퇴적물 모두 250～850 ㎛에서 가장 많은 비율을 차지하였다. 도로청소 전 퇴적물의 250～850 ㎛에서 전체 노면퇴적량의 28.2～56.6%(평균 39.4%), 수거퇴적물에서는 28.6～37.3%(평균 33.7%), 도로청소 후 퇴적물에서는 14.9～33.6%(평균 26.7%)를 차지하였다. 노면퇴적물에서 재비산 가능한 입자크기인 75 ㎛이하의 경우 도로청소 전 퇴적물에서는 전체 퇴적량의 7.0～12.9%(평균 8.7%), 수거퇴적물에서는 1.3～4.0%(평균 2.9%), 도로청소 후 퇴적물에서는 12.8～23.0%(평균 20.3%)를 차지하였다(Table 4～6). 국내 도심지의 도로청소 전 입도분포결과와 비교하면 Kim and Lee (2006)는 425～850 ㎛ 크기에서 가장 많은 비



(a) Before (b) Collected (c) After

Fig. 3. Proportion of each particle size. “Before” means sediment before road sweeping, “collected” means collected sediment by road sweeper, and “after” means sediment after road sweeping.

율(28.5～46.4%)를 나타내어 본 연구결과와 비교하여 입도 구분 범위에서 다소 차이가 나지만 전반적으로 가장 많은 비율을 나타낸 입도범위인 250～850 ㎛와 그 비율(28.2～56.6%)은 유사하였다. 반면에 Kim and Lee (2006)는 74 ㎛ 이하에서는 0.6～1.3%, Jeong et al. (2011)은 75 ㎛ 이하에서 6.33%의 비율을 차지하는 것으로 보고하고 있어 고속도로 노면퇴적물의 75 ㎛이하가 차지하는 비율이 도심지 도로보다 높은 것으로 나타났다.

도로청소 전 입자크기별 차지하는 비율은 경인고속도로와 경부고속도로에서 측정회차별 차이가 거의 없었으며, 중부고속도로와 서해안고속도로의 경우 가장 많은 비율을 차지하는 250～850 ㎛ 범위에서 측정회차별 차이를 나타내었다(Fig. 3(a)). 고속도로별 도로청소 전 입자크기별 차지하는 비율의 평균값을 비교한 결과 250～850 ㎛ 범위에서 고속도로별 차이를 나타내었으며 그 외 입자크기에서는 거의 유사한 값을 나타내었다(Fig. 3(a)).

수거퇴적물의 입자크기별 차지하는 비율은 각 고속도로의 회차별로 거의 유사하였으며, 고속도로별 평균값을 비교한 결과에서도 고속도로별 수거퇴적물의 입자별 차지하는 비율 역시 거의 유사하였다(Fig. 3(b)).

Table 4. The ratio of particle size of sediment on road before road sweeping

Particle size (㎛)	Jungbu	Gyeongin	Seohaean	Gyeongbu	Average
>4,750	2.8%	8.5%	4.0%	5.1%	5.1%
2,000～4,750	3.4%	11.7%	7.1%	18.8%	10.3%
850～2,000	7.3%	19.9%	15.7%	19.5%	15.6%
250～850	56.6%	28.2%	39.9%	32.8%	39.4%
125～250	16.4%	11.7%	18.0%	11.0%	14.3%
75～125	5.8%	7.2%	8.4%	5.6%	6.7%
50～75	4.0%	6.6%	3.0%	3.9%	4.4%
10～50	2.9%	4.7%	3.2%	2.8%	3.4%
2.5～10	0.6%	1.3%	0.6%	0.4%	0.7%
< 2.5	0.2%	0.2%	0.2%	0.1%	0.2%
Sediment (g/m^2)	176.9	37.6	83.3	166.1	116.0

Table 5. The ratio of particle size of collected sediment on road by road sweeper

Particle size (㎛)	Jungbu	Gyeongin	Seohaean	Gyeongbu	Average
>4,750	11.6%	10.0%	9.1%	11.2%	10.5%
2,000～4,750	12.3%	11.2%	14.3%	17.4%	13.8%
850～2,000	23.6%	19.1%	22.1%	21.5%	21.6%
250～850	28.6%	37.2%	37.3%	31.8%	33.7%
125～250	14.6%	13.0%	12.9%	11.5%	13.0%
75～125	5.9%	5.4%	3.1%	3.7%	4.5%
50～75	1.1%	1.6%	0.6%	1.1%	1.1%
10～50	1.7%	2.0%	0.6%	1.6%	1.5%
2.5～10	0.4%	0.3%	0.1%	0.2%	0.2%
< 2.5	0.1%	0.1%	0.0%	0.0%	0.1%
Sediment (g/m^2)	155.0	22.7	63.9	153.2	99.0

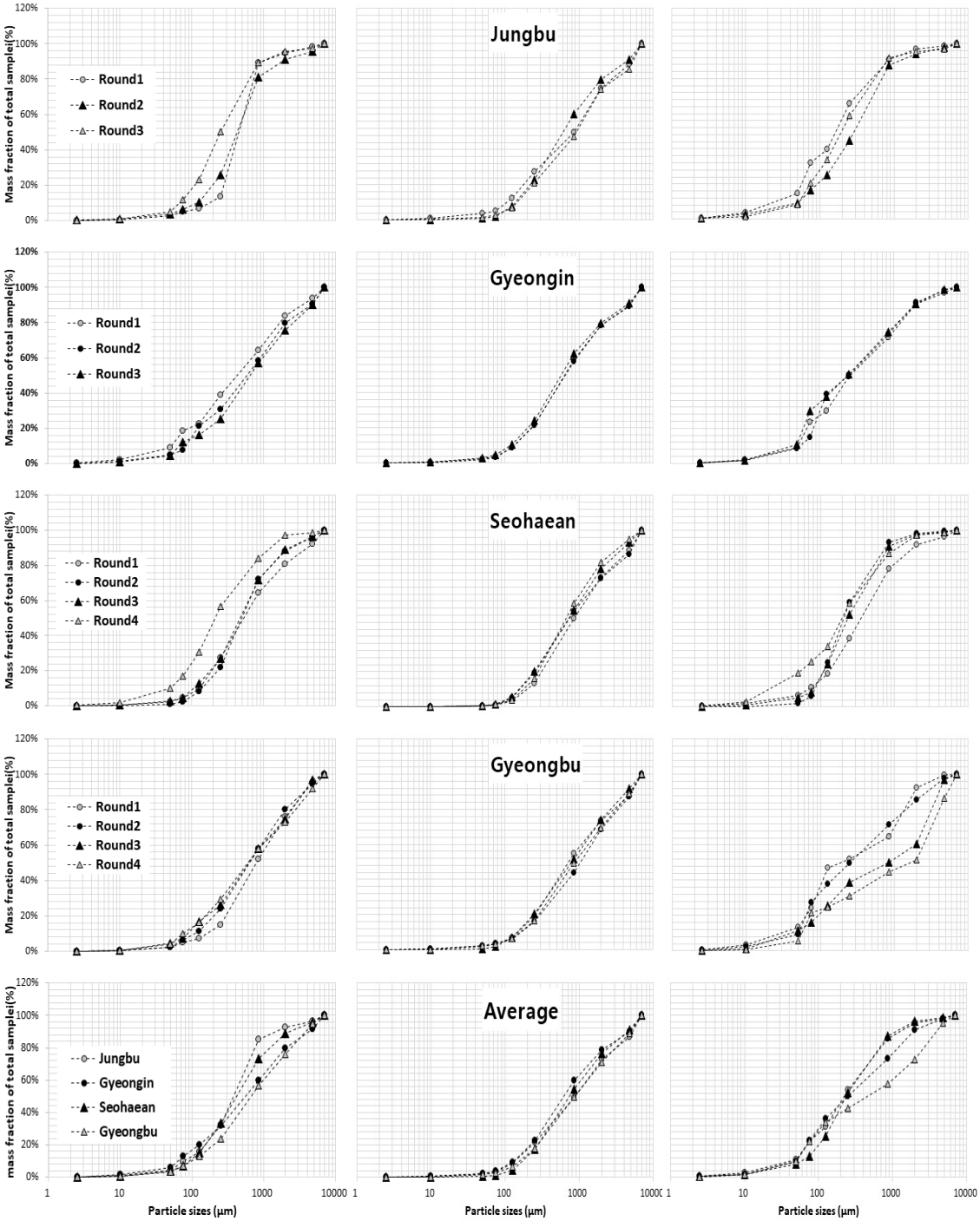
Table 6. The ratio of particle size of sediment on road after road sweeping

Particle size (㎛)	Jungbu	Gyeongin	Seohaean	Gyeongbu	Average
>4,750	2.1%	2.1%	1.5%	4.8%	2.6%
2,000～4,750	2.5%	6.8%	2.2%	22.6%	8.5%
850～2,000	5.2%	17.7%	9.0%	14.9%	11.7%
250～850	33.6%	23.3%	35.1%	14.9%	26.7%
125～250	23.7%	14.2%	26.8%	9.0%	18.4%
75～125	9.9%	13.0%	12.7%	11.4%	11.8%
50～75	12.3%	13.3%	4.5%	12.4%	10.7%
10～50	8.0%	7.7%	6.8%	8.0%	7.7%
2.5～10	2.1%	1.6%	1.1%	1.6%	1.6%
< 2.5	0.5%	0.3%	0.4%	0.3%	0.4%
Sediment (g/m^2)	21.84	14.92	19.42	12.88	16.98

도로청소 후 노면퇴적물의 입자크기별 차지하는 비율에서는 도로청소 전 노면퇴적물과 수거퇴적물의 비율과 다소 차이를 나타내었는데, 250～850 ㎛ 범위의 입자크기에서 도로청소 후 상당한 비율이 감소(청소 전 39.4%에서 청소 후 26.7% 감소)하는 것으로 나타났으며, 250 ㎛의 이상의 범위에서 차지하는 비율이 도로청소 전의 비율과 비교하여 청소 전 70.4%에서 청소 후 49.45%로 비율이 감소하였으며, 250 ㎛의 미만의 범위에서는 청소 전 29.7%에서 청소 후 50.6%로 비율이 증가하였다.

3.3 노면 퇴적물의 입도분포곡선 분석

도로청소 전 노면퇴적물의 입도분포곡선은 Fig. 4(a)와 같다. 도로청소 전 퇴적물의 경우, 동일한 지점내에서 측정회차별 입도분포곡선의 현저한 차이를 나타내지 않았으며, 이



(a) Before (b) Collected (c) After

Fig. 4. Particle size distribution curve. “Before” means sediment before road sweeping, “collected” means collected sediment by road sweeper, and “after” means sediment after road sweeping.

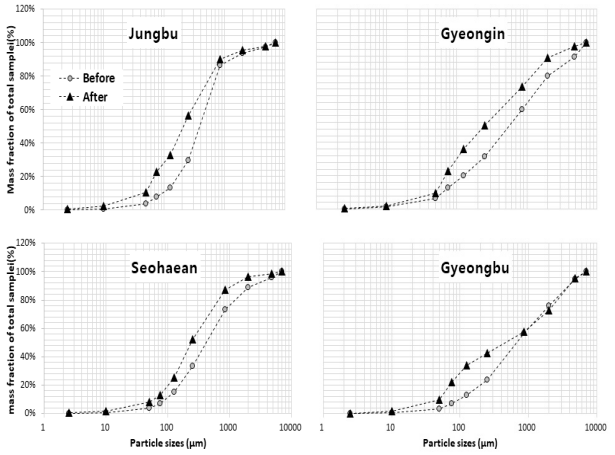


Fig. 5. Comparison of particle size distribution curves before and after road sweeping. “Before” means sediment before road sweeping and “after” means sediment after road sweeping.

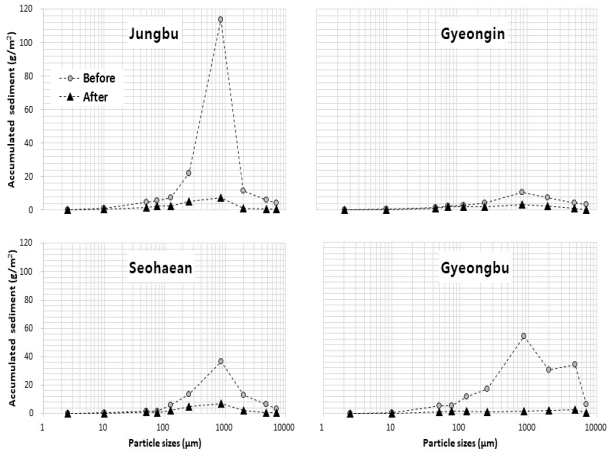


Fig. 6. Comparison of amount of sediment on road between before and after road sweeping. “Before” means sediment before road sweeping and “after” means sediment after road sweeping.

는 동일한 지점에서는 노면에 축적되는 오염원은 시기별 축적되는 양은 다를지라도(Fig. 1), 성분에 큰 변화가 없기 때문에 입도분포는 유사한 것으로 판단된다. 회차별 평균값인 고속도로별 도로청소 전 퇴적물의 입도분포곡선을 비교한 결과 중부고속도로와 서해안고속도로와 같이 S곡선과 경인고속도로와 경부고속도로와 같이 직선을 나타내는 경향으로 구분되었는데, 250～850 ㎛ 구간의 입도가 차지하는 비율이 높을수록 강한 S곡선을 나타내었다. 따라서, 고속도로 청소 전 노면퇴적물의 입도분포곡선에 영향을 주는 인자는 250～850 ㎛ 구간의 입도가 차지하는 비율인 것으로 나타났다.

도로청소차에 수거된 퇴적물의 입도분포곡선은 Fig. 4(b)와 같다. 동일한 고속도로내에서 측정회차별 입도분포곡선은 거의 유사했으며, 회차별 평균값인 고속도로별 수거퇴적물의 입도분포곡선에도 거의 유사한 경향을 나타내었다.

도로청소 후 노면퇴적물의 입도분포곡선은 Fig. 4(c)와 같다. 도로청소 후 노면퇴적량이 작기 때문에 실험에 따라 발생하는 오차의 영향이 상대적으로 클 것으로 판단되나, 경부고속도로를 제외하면 측정회차별 입도분포곡선의 현저한 차이는 찾아볼 수 없었다.

측정 회차별 평균값에 의한 고속도로별 도로청소 후 노면퇴적물의 입도분포곡선은 도로청소 전 노면퇴적물의 입도분포곡선보다 위에 있었으며(Fig. 5), 이는 도로청소 후 노면퇴적물 중 250 ㎛ 이하의 입경이 차지하는 비율이 증가한 결과이며, 250 ㎛ 이하의 입경에서는 도로청소차에 의한 노면퇴적물 제거효과가 250 ㎛ 이상의 입경보다 떨어지기 때문이다.

3.4 도로청소에 의한 입도분포별 노면퇴적물 제거 효과

도로청소에 의한 노면퇴적물 처리효율과 도로청소 전・후의 입도크기별 퇴적량 변화는 각각 Fig. 6과 Table 7과 같다. 처리효율은 입자크기가 가장 큰 4,750 ㎛이상에서 가장 높은 처리효율(84.40～92.2%, 평균 87.3%)을, 입자크기가 가장 작은 2.5 ㎛이하에서 가장 낮은 처리효율(15.4～61.1%, 평균 38.0%)을 나타내었다. 다만, 노면퇴적물의 양적인 측면에서는 250～850 ㎛ 구간의 입도에서 가장 많은 노면퇴적량이 감소하였다(Fig. 6).

Table 7. Removal efficiency by particle size

Particle size (㎛)	Jungbu	Gyeongin	Seohaean	Gyeongbu	Average
>4,750	84.4%	88.0%	84.5%	92.2%	87.3%
2,000～4,750	87.0%	76.5%	86.3%	88.8%	84.7%
850～2,000	89.2%	64.3%	76.7%	91.1%	80.3%
250～850	87.0%	66.8%	62.5%	94.8%	77.8%
125～250	76.5%	51.8%	35.2%	91.9%	63.9%
75～125	68.5%	29.2%	36.1%	40.6%	43.6%
50～75	52.7%	19.5%	29.7%	60.3%	40.6%
10～50	59.5%	31.2%	8.3%	58.8%	39.5%
2.5～10	55.2%	48.9%	10.9%	41.8%	39.2%
< 2.5	61.1%	40.6%	15.4%	35.0%	38.0%

Table 3의 분류기준에 따른 제거효율은 Table 8과 같다. Gravel의 제거효율은 81.5～89.6%(평균 85.5%), Corse sand는 65.7～93.3%(평균 78.9), Fine sand는 35.2～91.9%(평균 63.9%), Very fine sand는 29.2～68.5%(평균 43.6%), Silt loading은 18.8～58.0%(평균 40.2%), TSP는 9.6～58.8%(평균 39.8%), PM10은 13.0～56.5%(평균 39.7%), PM2.5는 15.4～61.1%(평균 38.0%)를 나타내었다.

입자크기에 따른 노면퇴적물 처리효율의 관계는 Fig. 7과 같다. 재비산먼지(Silt loading) 입경의 크기인 75 ㎛에서 뚜렷한 차이를 나타내는데, 75 ㎛이하에서는 도로청소에 의한 제거효율이 약 40% 내・외로 제거효율이 일정하였으나, 75 ㎛이상에서는 로그함수의 형태로 높은 결정계수(0.91)를 나타내었다. 로그함수임을 감안할 때 75 ㎛이상에서 노면퇴적물의 입경이 증가할수록 도로청소에 의한 제거효율은 급격히 증가하는 것으로 나타났다.

Table 8. Removal deficiencies by road sweeping of sediment classification

Classification	Jungbu	Gyeongin	Seohaean	Gyeongbu	Average
Graval	85.3%	81.5%	85.6%	89.6%	85.5%
Coarse sand	90.0%	65.7%	66.6%	93.3%	78.9%
Fine sand	76.5%	51.8%	35.2%	91.9%	63.9%
Very fine sand	68.5%	29.2%	36.1%	40.6%	43.6%
Silt loading	56.1%	27.8%	18.8%	58.0%	40.2%
TSP	58.8%	35.1%	9.6%	55.7%	39.8%
PM_{10}	56.5%	47.6%	13.0%	41.7%	39.7%
$PM_{2.5}$	61.1%	40.6%	15.4%	35.0%	38.0%

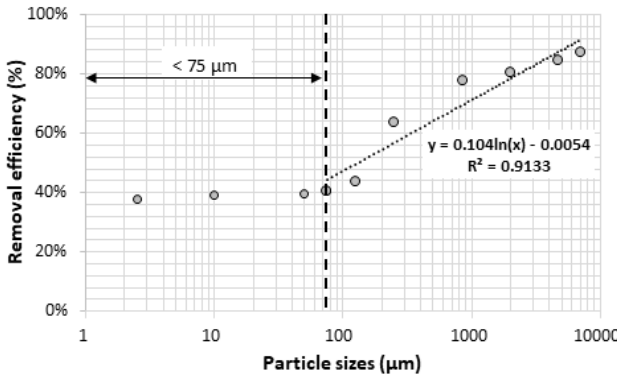


Fig. 7. The relationship between particle size and its removal efficiency (%).

3.5 노면퇴적량에 따른 도로청소 제거효과

도로청소에 따른 고속도로 노면 퇴적물의 제거효율은 고속도로에 따라 상이하게 나타났다(Table 9). 경부고속도로의 경우 83.3～96.4%(평균 88.7%)의 가장 높은 제거효율을 나타내었다. 가장 낮은 제거효율은 서해안고속도로이며 13.8～95.1%(평균 59.9%)를 나타내었다. 중부고속도로와 경인고속도로에서 도로청소에 의한 평균 제거효율은 각각 83.0%, 60.3%였으며 4개 고속도로 전체 도로청소에 의한 평균 제거효율은 69.0%인 것으로 나타났다(Table 9).

경인고속도로를 제외한 모든 지점에서 가장 많은 노면퇴적량에서 제거효율이 가장 높았으며, 비교적 적은 노면퇴적량에서 제거효율이 가장 낮았다. 경인고속도로의 경우 청소 전 노면퇴적량이 50 g/m^{2}이하로 상대적으로 매우 작고 노면퇴적량의 변동폭 또한 작았기 때문에 뚜렷한 경향을 찾을 수 없었다.

도로청소 전 노면퇴적량에 따른 도로청소 제거효율 분석 결과는 Fig. 8과 같다. 도로청소 전 노면퇴적량 100 g/m^2 이상일 경우에는 측정지점별 구분없이 노면퇴적량이 증가할수록 도로청소에 의한 제거효율은 증가하였으며 도로청소 전 노면퇴적량 100 g/m^2 미만에서는 도로청소의 제거효율은 청소 전 퇴적량보다는 지역별 편차가 컸다.

도로청소의 퇴적물 제거효율은 노면축적량, 청소차운영방식과 방법, 도로의 형태, 도로의 노후화 등에 영향을 받는다

Table 9. Relationship between SDR before road sweeping and its removal efficiency.

		Before	After	Efficiency
Jungbu	Round1	320.9	18.0	94.4%
	Round2	105.6	20.9	80.2%
	Round3	104.1	26.6	74.4%
	Average	176.9	21.8	83.0%
Gyeongin	Round1	31.2	14.7	52.9%
	Round2	48.7	19.4	60.2%
	Round3	33.0	10.7	67.7%
	Average	37.6	14.9	60.3%
Seahaean	Round1	72.1	32.4	55.0%
	Round2	186.0	9.1	95.1%
	Round3	29.0	25.0	13.8%
	Round4	46.3	11.2	75.9%
	Average	83.3	19.4	59.9%
Gyeongbu	Round1	115.6	19.3	83.3%
	Round2	78.1	9.9	87.3%
	Round3	407.1	14.5	96.4%
	Round4	63.6	7.7	87.8%
	Average	166.1	12.9	88.7%
Average				69.0%

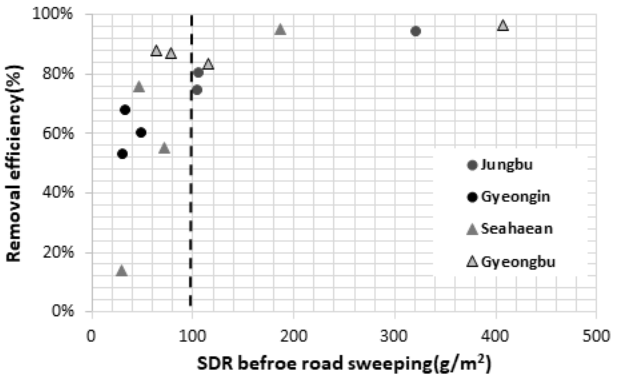
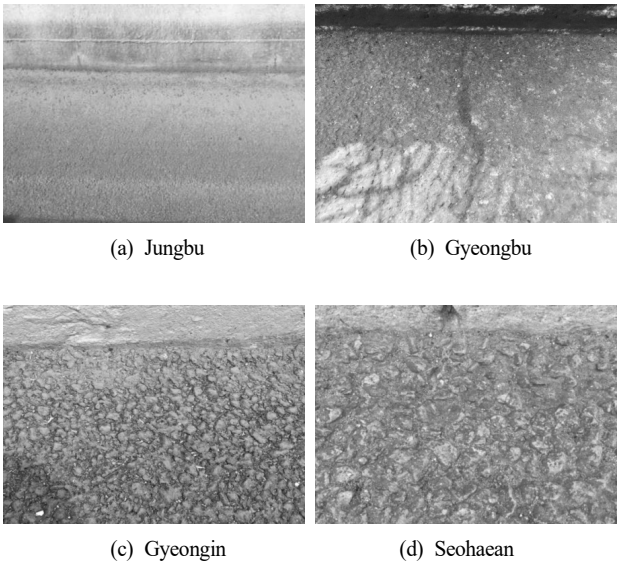


Fig. 8. The relationship between SDR before road sweeping and removal efficiencies.

(Curtis, 2002; Jang et al., 2009; Sutherland and Jelen, 1997; U. S. EPA., 1999). 중부고속도로와 경부고속도로의 경우 매끈한 반면, 경인고속도로와 서해안고속도로의 도로노면은 거칠기가 상대적으로 심한 편이었다(Fig. 9). 노면퇴적량이 적으면 도로노면의 틈 사이에 퇴적되어 도로청소차에 의한 제거효율을 떨어뜨리고 도로의 종류와 노후화에 따라 도로 노면의 틈 사이에 퇴적되는 양이 다르기 때문에 고속도로별 제거효율에 큰 차이를 보이며 퇴적량과 제거효율과의 상관성은 떨어지는 것으로 판단된다. 그러나 도로노면의 틈을 어느 정도 매울 수 있는 퇴적물의 양 이상이 축적된다면 도로청소에 의한 노면퇴적물의 제거효과가 증가되고 노면의 상태에



(a) Jungbu (b) Gyeongbu

(c) Gyeongin (d) Seohaean

Fig. 9. Road surface conditions.

대한 영향은 감소하여 노면퇴적물의 축적량이 증가할수록 노면퇴적물 제거효과가 증가한 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 100 g/m^2 이하에서는 도로의 종류와 노후화에 따른 도로노면의 상태가, 100 g/m^2 이상에서는 노면축적량이 도로청소에 의한 노면퇴적물 제거효과에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

환경적인 측면을 고려할 때, 노면퇴적물의 전체 제거효율을 증가시키는 것보다는 미세입자에 대한 제거효율을 증가시키는데 초점을 맞추어야 한다. ME (2012)의 연구 결과에 따르면 청소차에 의해 수거된 퇴적물의 TOC, TN, TP 분석 결과 모래나 자갈보다는 점토나 미사에서 상대적으로 높은 오염물질 함량을 나타내는 것으로 보고하고 있다. Jeong et al. (2020)은 도로퇴적물의 입도별 중금속함량을 분석한 결과 입자크기 63 ㎛이하에서 중금속 13개 측정항목 모두 가장 높은 중금속 함량을 나타내는 것으로 보고하였다. PAHs 또한 입자크기가 작을수록 높은 PAHs의 함량을 나타내며 43 ㎛이하의 노면퇴적물에 함유된 고분자 PAHs는 250–841 μm의 입자에 함유된 양보다 약 10배 정도 높은 것으로 보고되었다(Lau and Stenstrom, 2005). 대기환경측면에서는 도로노면에 쌓인 퇴적물 중 75 ㎛이하의 입자는 차량의 운행으로 인하여 재비산되어 대기오염을 유발시키며 노면퇴적량이 많을수록, 화물차 운행비중이 클수록 재비산되는 양은 많아지는 것으로 보고되고 있다(ME, 2008). 국내 2017 대기오염물질 배출량 보고서에 따르면 연간 비산먼지 배출량(TSP 기준)은 422,420톤 중 도로재비산먼지량은 161,824톤으로 약 38%를 차지하고 있으며 2015년 이후 해마다 증가하고 있는 것으로 보고되고 있다(National Air Emission Inventory and Research Center, 2017). 따라서, 비점오염측면에서나 대기오염측면에서 청소차에 의한 도로노면 퇴적물 수거시 미세입자에 대한 수거효율을 증가시킬 수 있는 도로청소차의 개선 혹은 도로청소차 운행방법 등의 개선이 이루어져야할 것이다.

4. Conclusion

본 연구에서는 2019년 5월～11월 사이 중부고속도로와 경인고속도로, 서해안고속도로, 경부고속도로 구간에 대하여 고속도로 청소에 의한 입도별 제거효율을 분석하였다. 도로노면에 축적된 퇴적물은 건기일수가 길어질수록 일평균 퇴적량이 감소하며, 시기별 일 퇴적량이 상이한 것으로 나타났다. 도로청소 전·후 노면퇴적물과 수거퇴적물 모두 250～850 μm사이에 가장 많은 비율을 차지하는 것으로 나타났다. 도로청소 전 노면퇴적물의 입도분포곡선은 전반적으로 유사한 경향을 나타내었으나, 250～850 μm의 입경이 차지하는 비율의 차이에 따라 고속도로별 입도분포곡선에 약간의 차이를 나타내었다. 수거퇴적물의 입도분석 결과, 고속도로별 유사한 입도분포를 나타내었다. 노면퇴적물을 토양 혹은 대기오염기준으로 입자크기를 분류하여 도로청소에 의한 제거효율을 분석한 결과 Gravel이 81～90%(평균 86%), Corse sand는 66～93%(평균 79%), Fine sand는 35～92%(평균 65%), Very fine sand는 29～72%(평균 45%), Silt loading은 19～63%(평균 42%), TSP는 10～63%(평균 41%), PM10은 13～59%(평균 40%), PM2.5는 15～60%(평균 38%)를 나타내었다. 75 μm이상에서는 입자크기가 클수록 도로청소에 의한 노면퇴적물 제거효과가 급격히 증가하는 것으로 나타났으며, 75 μm이하에서는 입자크기가 클수록 제거효과가 현저하게 증가하지 않았으며 40%내외의 일정한 제거효율을 나타내었다.

경부고속도로의 경우 도로청소에 의한 노면퇴적물의 제거효율이 83.3～96.4%(평균 88.7%), 서해안고속도로는 13.8～95.1%(평균 59.9%), 중부고속도로는 74.4～94.4(평균 84.1%), 경인고속도로는 52.9～67.7%(평균 60.3%)였으며 4개 고속도로 전체 도로청소에 의한 평균 제거효율은 69.0%인 것으로 나타났다. 노면퇴적량이 적을수록 도로의 종류와 노후화에 따른 도로노면의 상태에 영향을 받아 지역별 제거효율의 편차가 심하고 상대적으로 낮은 제거효율을 나타내었으나, 노면퇴적량이 많을수록 노면퇴적물 제거효율은 증가하고 지역별 편차는 없었다.

노면퇴적물 중 미세입자가 차지하는 비율이 적기 때문에 퇴적물 전체량에 대한 제거효율측면에서는 미세입자의 중요성이 떨어진다. 그러나, 미세입자에서 오염물질 함량이 높은 것과 대기오염인 비산먼지 배출 중 도로재비산이 주요한 오염원임을 감안할 때, 도로청소에 의한 미세입자의 제거효율 향상은 환경적인 측면에서 매우 중요하며 도로청소에 의한 미세입자의 제거효율을 증가시키는 대책마련에 초점을 맞추어야 할 것이다.

References

Amato, F., Pandolfi, M., Viana, M., Querol, X., Alastuev, A., and Moreno, T. (2009). Spatial and chemical patterns of PM10 in road dust deposited in urban environment, *Atmospheric Environment*, 43(9), 1650-1659.

Ball, J. E., Jenks, R., and Aubourg, D. (1998). An assessment of the availability of pollutant constituents on road surfaces, *Science of Total Environment*, 209(2-3), 243-254.

Breault, R. F., Smith, K. P., and Sorenson, J. R. (2005). *Residential street-dirt accumulation rates and chemical composition, and removal efficiencies by mechanical- and vacuum-type sweepers, New Bedford, Massachusetts, 2003-04*, US Department of the Interior, US Geological Survey, USA.

Calvillo, S. J., Williams, E. S., and Brooks, B. W. (2015). Street dust: Implications for stormwater and air quality, and environmental management through street sweeping, *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 233, 71-128.

Cho, K. S. (2003). Characteristics of heavy metal pollution in contaminated roadside sediments in Jeonju city, Korea, *Journal of Korean Earth Science Society*, 24(8), 711-720. [Korean Literature]

Curtis, M. C. (2002). *Street sweeping for pollutant removal,* Department of Environmental Protection, Watershed Management Division, Rockville, Montgomery County, Md.

Gadd, J. and Kennedy, P. (2000). *Preliminary examination of organic compounds present in tyres, brake pads and road bitumen in New Zealand*, Prepared by Kingett Mitchell Ltd for Ministry of Transport.

Jang, Y. C., Jain, P., Tolaymat, T., Dubey, B., and Townsend, T. (2009). Characterization of pollutants in Florida street sweepings for management and reuse, *Journal of Environmental Management*, 91(2), 320-327.

Jeong, H., Choi, J. Y., Lee, J., Lim, J., and Ra, K. (2020). Heavy metal pollution by road-deposited sediments and its contribution to total suspended solids in rainfall runoff from intensive industrial area, *Environmental Pollution*, 256, https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115028

Jeong, K., Kang, H. M., and Ko, S. O. (2011). Characteristics of collected sediments from road sweeping and reduction in the nonpoint source pollutants loading, *Journal of the Korean Society of Road Engineers*, 13(2), 187-193. [Korean Literature]

Kang, H. and Kang, H. (2014). *Evaluation of non-point source pollution reduction by expressway sweeping,* RT-2014-57-534.9607, Environment Research Division, Korea Expressway Corporation Research Institute, Korea. [Korean Literature]

Kim, B. G. and Lee, B. C. (2006). A study on heavy metal contamination in the different size fractions of deposited road particles (DRPs), *Journal of Environmental Science International,* 15(12), 1171-1175. [Korean Literature]

Kim, S. J., Jeon, Y. T., Oh, Y. T., Jee, S. I., and Won, C. H. (2015). A study on road sediment pollutants correlation between particle size distribution on pollutants load, *Journal of Korean Society of Environmental Technology*, 16(1), 35-45. [Korean Literature]

Korea Expressway Corporation. (2021). *Data inquiry*, http://data.ex.co.kr/portal/traffic/trafficByIc (Accessed June, 2021).

Lau, S. and Tenstrom, M. (2005). Metals and PAHs adsorbed to street particles, *Water Research*, 39(17), 4083-4092.

Lee, J., Jeong, H., Ra, K., and Choi, J. Y. (2020). Assessment of particle size distribution and pollution impact of heavy metals in road-deposited sediment (RDS) from Shihwa industrial complex, *Journal of Environment Impact Assessment*, 29(1), 8-25. [Korean Literature]

Malmquist, P. A. (1979). Atmospheric fallout and street cleaning-effects on urban storm water and snow, *Ninth International Conference on Water Pollution Research*, 495-505.

Martuzevicius, D., Kliucininkas, L., Prasauskas, T., Krugly, E., Kauneliene, V., and Strandberg, B. (2011). Resuspension of particle matter and PAHs from street dust, *Atmospheric Environment*, 45(2), 310-317.

Ministry of Environment (ME). (2008). *Feasibility study of road re-fugitive dust reduction pilot project*, Ministry of Environment. [Korean Literature]

Ministry of Environment (ME). (2012). *A Feasibility of analysis of road sweeping for reducing non-point source pollution*, Ministry of Environment. [Korean Literature]

National Air Emission Inventory and Research Center. (2017). *National air pollution emission*, National Air Emission Inventory and Research Center, Ministry of Environment. [Korean Literature]

Sartor, J. D. and Boyd, G. B. (1972). *Water pollution aspects of street surface contaminants (Vol. 2)*, US Government Printing Office.

Sutherland, R. C. and Jelen, S. L. (1997). *Contrary to conventional wisdom, street sweeping can be an effective BMP*, Advances in modeling the management of stormwater impacts, 5, Computational Hydraulics International, Cuelph, Ont., Canada, 179-190.

United States Environmental Protection Agency (U. S. EPA.). (1985). *Project summary: Performance evaluation of an improved street sweeper,* Air and Energy Engineering Research Laboratory, United States Environmental Protection Agency, Research Triangle Par

United States Environmental Protection Agency (U. S. EPA.). (1999). *Storm water management fact sheet-Dust control*, EPA 832-F-99-003, Washington, D.C.

United States Geological Survey (USGS). (2007). *Evaluation of street sweeping as a stormwater-quality-management tool in three residential basins in Madison*, Wisconsin, United States Geological Survey, Reston.

Van Donkelaar, P. (1990). Environmental effects of crankcase-and mixed-lubrication, *Science of The Total Environment*, 92, 165-179.

Zhao, Q., Yu, Q., and Chen, L. (2010). Particulate matter and particle-bound polycyclic aromatic hydrocarbons in the Dapu road tunnel in Shanghai, *International Journal of Environment and Pollution*, 41(1-2), 21-37.